使用Mimics进行3D重建时不同复原精度对头骨测量数值的影响

张玄[1，2，3]；张亚盟[1，2，3]

1.中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所，北京 100044；2. 生物演化与环境卓越创新中心，北京 100044；3.中国科学院大学，北京 100039；

摘要：在古人类研究中，骨骼，尤其是头骨性状的测量是获得标本特征信息的主要手段。随着技术的发展，CT技术及三维复原技术为骨骼测量带来了巨大的便利。其中Mimics软件作为常用的三维重建软件之一，在复原过程中为使用者提供了低、中、高、最佳这四种精度的选择。我们希望获知在不同复原精度得到的模型上进行测量得到的结果存在何种程度的差异，以便在未来研究过程中选择最合适的标准。在本研究中，我们选择了顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、乳突小房表面积、颅容量、乳突小房体积这六项性状的测量数据作为检测指标，计算同一批现代人标本在Mimics中采用不同精度复原得到的模型间测量数值的差异，根据Mimics的复原模型简化规则，我们选择未精简的最佳精度模型作为标准进行非参数检验、配对 t 检验及计算测量差异占比。结果表明，这六项的不同简化精度模型测量数据与最佳精度模型测量数据的非参数检验及配对t检验均具有显著差异。顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、颅容量的测量差异占比基本均小于3%，而乳突小房表面积的低精度测量差异占比可达到50%以上，乳突小房体积低精度测量差异占比可达120%以上。除去简化过程造成的模型表面膨胀外，乳突小房的多气房结构造成不同精度之间存在的绝对差异比上一整体体量小区域而形成的巨大相对差异提示我们，在三维模型的测量中，对于头骨内部腔窦这样小体量表面粗糙的部分的复原精度选择及数据比较需要格外谨慎。

关键词：Mimics，三维重建，头骨测量，差异检验

1 引言

在人类学的研究中，研究者常常通过测量骨骼，尤其是头骨特征部位的角度、长度、面积、体积等，来获得标本的特征信息，进而对标本进行分类等。传统的测量是在标本实体上进行手工测量，如果标本的保存状况不佳，或是标本数量过于庞大，那对于观测者来说都是令人困扰的问题。

随着技术的发展，现在，研究者可以通过CT扫描或是三维激光扫描获得标本信息，而后在计算机中重建为三维模型再测量。这种方法在一方面，帮助减少了标本可能受到的损伤，另一方面则可以将大批量的标本实体压缩为数据资料，为研究交流创造了极大的便利除此之外，CT扫描更关键的功能在于它可以帮助研究者“穿透”和“放大”所研究的标本，通过与重建软件的配合，研究者得以在不破坏标本的情况下对内部结构与细微结构进行研究。基于以上优点，国内外众多学者广泛使用CT扫描后三维重建模型进行研究，在脑演化[1]、创伤[2]、头骨的内部结构[3][4]、牙齿的内部结构[5][6]等方面都做出了杰出的成果。

而在重建软件中，Mimics因其操作可视化、图像分割方便快捷、界面友好、可以导出多种通用三维模型格式等优点而成为最常使用的CT重建软件之一。Mimics提供了多种计算模型的预设，根据矩阵简化（matrix reduction）程度不同，分为低精度、中精度、高精度、最佳精度，计算出的三维模型细节程度逐个提升。由于更高的精度会做更少的简化在模型更加细化的同时，模型文件的大小也会成倍增长：一般来讲，标本本身体积越大、

细节越多，精度的提升造成的模型文件大小的增长也越多，对同一原始 CT 数据最佳精度模型的大小可能是低精度的几十倍，计算机在计算这些最佳精度模型时耗费的时间也是低精度模型的数倍甚至数十倍，这给大体积标本的测量以及大样本量测量带来了巨大的麻烦。

在此前的研究中，考虑到较大的样本量及高精度带来的巨大文件体积，作者倾向于选择低精度计算三维模型，并在此基础上进行测量。然而，在实际操作中，我们发现针对颞骨乳突小房进行的体积测量数据在更高精度的模型中都产生了不同程度的缩小。为了探究精度不同带来的模型差异是否可能造成测量结果的显著差异，以及这种差异都在哪些测量中体现，我们需要一系列有代表性的测量对比。因此，我们选择比较同一头骨标本在 Mimics 进行不同精度的重建后测量得到的表面长、弦长、面积、体积等，探究在 CT 重建中使用 Mimics 低精度模型测量的可行性。

2 研究材料与方法

2.1 研究材料

头骨测量中主要包括了长度测量、角度测量、面积测量、体积测量等[7]。考虑到模型的差异主要体现在模型的表面变化，因此我们选择了顶骨矢状弦、颅周、头盖面积[8]、乳突小房表面积、颅容量、乳突小房体积作为检测性状，分别代表弦长测量，弧长测量，较大单位的面积测量，较小单位的面积测量，较大单位的体积测量，较小单位的体积测量。

本文的研究材料为距今约 300 年左右的考古遗址墓葬出土的云南现代人头骨。其中进行顶骨矢状弦测量的标本 30 例，颅周测量标本 30 例，头盖面积测量标本 30 例，颅容量测量标本 30 例，乳突小房表面积及体积测量标本 30 例共计 60 侧（此前研究[9]发现乳突小房没有侧别差异，因此进行双侧混合统计）。标本保存在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所（以下简称古脊椎所）。根据标本的保存状况，检测不同性状时所使用的标本可能不是同一组。

2.2 头骨 CT 扫描及模型重建

头骨 CT 数据的采集使用的是古脊椎所的高分辨率工业 CT 机（450kV-工业 CT），扫描电压为 450kV，空间分辨率为 160μm，所得 CT 扫描的原始数据首先使用高能所研发中心开发的重建软件转换为二维影像后，在 Dell 图形工作站上使用可视化三维图像处理软件 Mimics17.0 对二维断层扫描影像进行重建。

Mimics 通过使用矩阵简化算法，为建模提供四种精度：低精度、中精度、高精度、最佳精度，低精度的简化为在 xy 方向上 6×分辨率，z 方向上 2×分辨率；中精度为 xy 方向 3×，z 方向同样 2×；高精度为 xy 方向 2×，z 方向 1×，即 z 方向不简化；而最佳精度在 xyz 方向均不简化，因此我们一般认为最佳精度复原模型为同一 CT 扫描处理后能得到的最接近真实的模型。为了对简化后的模型进行比较，我们在同一阈值选取结果的基础上选择不同的计算精度导出不同精度的模型，进行后续测量。

2.3 **头骨模型测量**

将导出同个标本的四种精度模型一同导入逆向工程软件 rapidform XOR 中，进行测量

2.3.1 顶骨矢状弦的测量

顶骨矢状弦为前囟点至人字点的直线距离[7]。通过在模型上点出前囟点及人字点，然后测量两点间的距离即可得到顶骨矢状弦长。

2.3.2 颅周的测量

颅周为通过眉间点和颅后点的颅骨水平周长[7]。测量时，先通过确定鼻根点、上齿槽前点及枕外隆凸点而做出头骨的正中矢状面后确定眉间点及颅后点，通过这两点作与正中矢状面垂直的平面即为 Plane 5，这个平面与头骨相交造成的切面的外周长即为颅周（图 1A 中蓝色线条所示）。

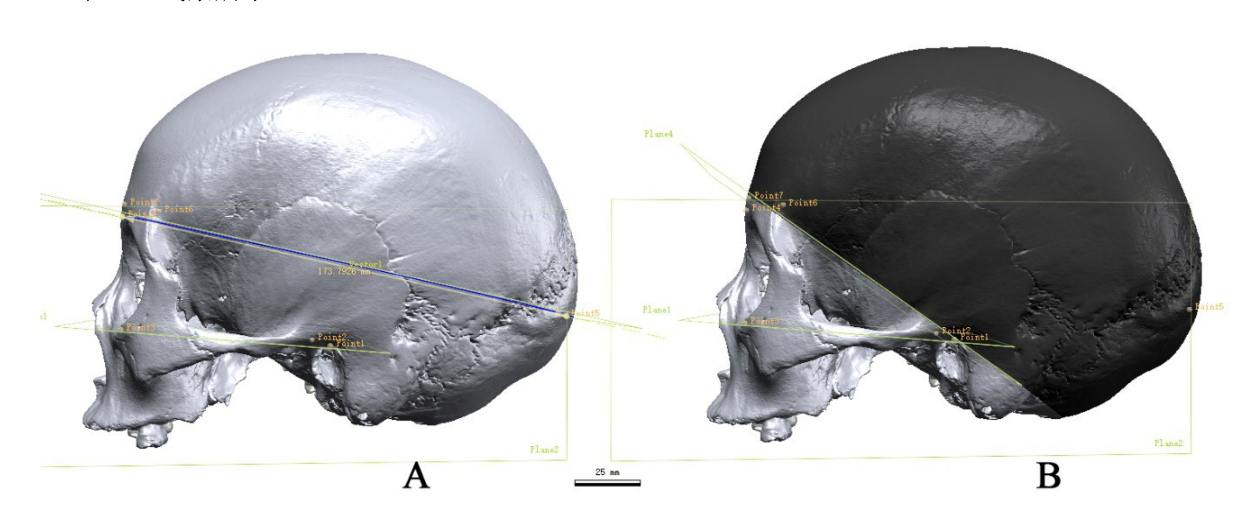


图 1 颅骨三维重建模型在 rapidform 中的颅周（A）及头盖面积（B）测量方法
Fig.1 The measuring method of cranial horizontal circumference (A) and surface area of cranium (B) on 3D reconstruction model of skull

2.3.2 头盖面积的测量

根据参考文献[8]，我们选择过眉间上点及左右耳门上点的平面所切割的头骨上部外表面定义为头盖面积，在图 1B 中示为黑色。

2.3.3 乳突小房表面积、体积及颅容量的测量

通过阈值选取的方法选择出乳突小房、颅内模区域后重建获得三维模型。乳突小房的表面积、体积及颅容量由 rapidform 软件直接计算复原的乳突小房模型的表面积体积、颅内模的体积得到。

2.4 **数据统计**

完成测量后，将数据记录并导入到 SPSS 20.0 软件中，对于每个测量指标，我们以最佳精度复原模型的测量结果作为标准，将其他精度的数据与之进行两两配对的 t 检验，比较不同精度模型的测量差异占比，在这里。

3 结果

3.1 不同精度下测量值

根据确定的测量方法，我们对同一标本采用不同计算精度重建的模型的顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、颅容量、乳突小房表面积以及体积进行了测量，测量结果如表 1 所示：

表 1 不同精度下测量结果[均值（最小值~最大值），标准差]
Tab.1 Measuring data in different qualities[average (min~max), SD]

	低精度	中精度	高精度	最佳精度
	均值（最小值~最大值），标准差	均值（最小值~最大值），标准差	均值（最小值~最大值），标准差	均值（最小值~最大值），标准差
顶骨矢状弦(mm)	110.74(103.60~122.87)，SD=5.41	110.47(103.17~122.61)，SD=5.48	110.41 (103.15~122.57)，SD=5.50	110.31(103.16~122.50)，SD=5.47
颅周(mm)	504.98(476.50~535.58)，SD=15.23	505.64(476.04~536.07)，SD=15.34	507.19(479.53~536.41)，SD=15.20	509.63(482.36~536.08)，SD=15.20
头盖面积(cm^2)	567.86(510.15~666.71)，SD=37.42	568.38(510.33~668.44),SD=37.18	570.27(512.61~669.83),SD=36.72	571.37(512.18~672.51),SD=37.19
乳突小房表面积(cm^2)	37.94(8.56~69.56)，SD=15.43	51.10(8.51~104.74)，SD=23.76	58.83(8.66~123.02)，SD=29.09	60.03(8.30~124.15)，SD=31.15
颅容量(cm^3)	1319.92(1077.28~1603.10)，SD=110.65	1303.99(1063.18~1584.85)，SD=109.80	1298.72(1058.39~1578.93)，SD=109.34	1293.11(1053.42~1572.54)，SD=109.22
乳突小房体积(cm^3)	5.68(0.81~13.22). SD=3.13	4.60(0.61~11.52)，SD=2.72	4.11(0.55~10.62)，SD=2.49	3.61(0.48~9.60)，SD=2.25

对于顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、颅容量，其各精度的测量结果分布如图 2 所示，整体差异不大。顶骨矢状弦及头盖面积测量值随精度变化不明显，颅周测量值随精度提升有一定提升，颅容量测量值则随精度提升有所下降。

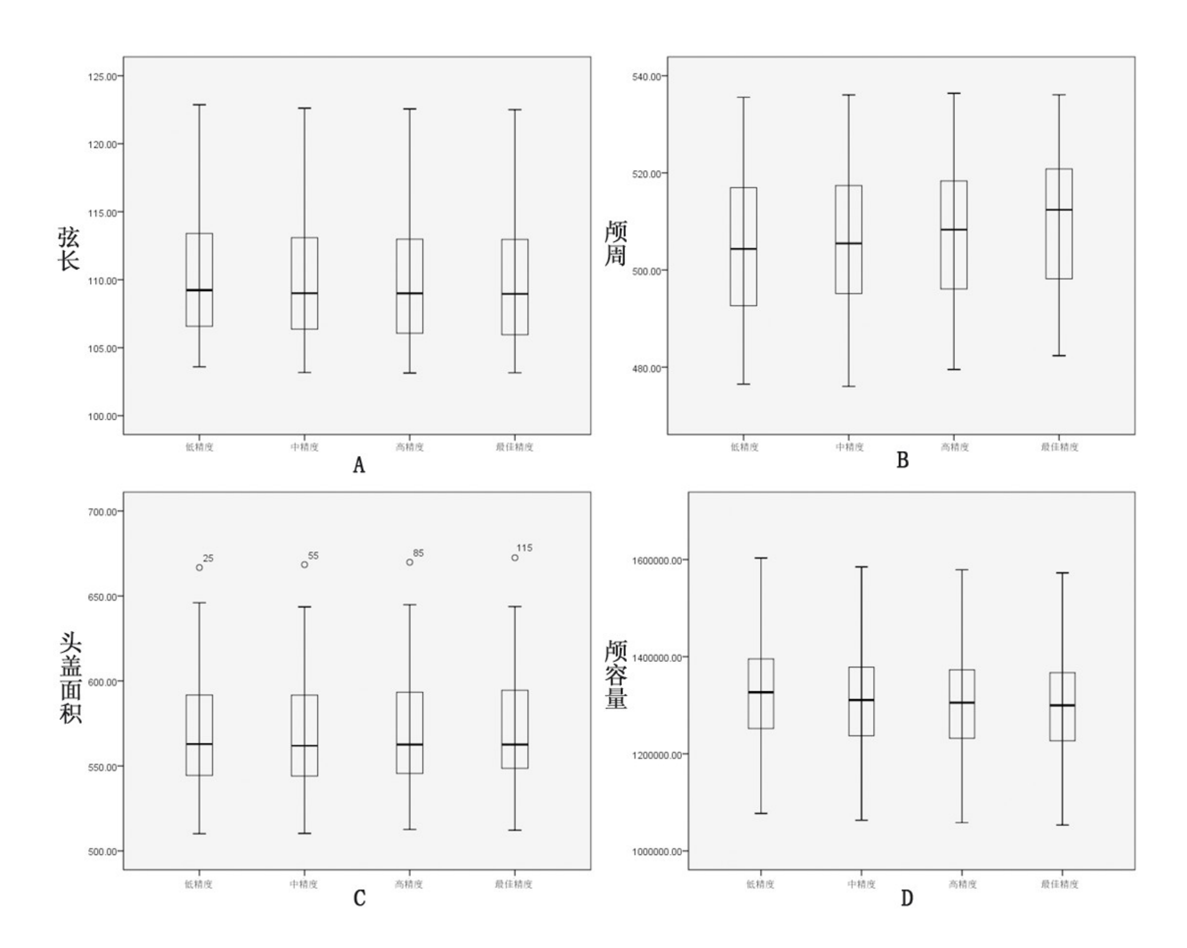


图 2 顶骨矢状弦（A）、颅周（B）、头盖面积（C）、颅容量（D）不同复原精度测量结果分布箱图

Fig. 2 Box-plot of cranial sagittal chord (A), cranial horizontal circumference (B), cranium area (C), cranial capacity (D) in different reconstructing qualities

对于乳突小房的表面积和体积，其各精度的测量结果分布如图 3 所示，整体变化较大：乳突小房表面积测量平均值从低精度到高精度有明显升高，数据分布范围更分散，但高精度与最佳精度的数据整体分散情况相近；乳突小房体积测量平均值从低精度到最佳精度显著降低，数据分布范围也缩小。

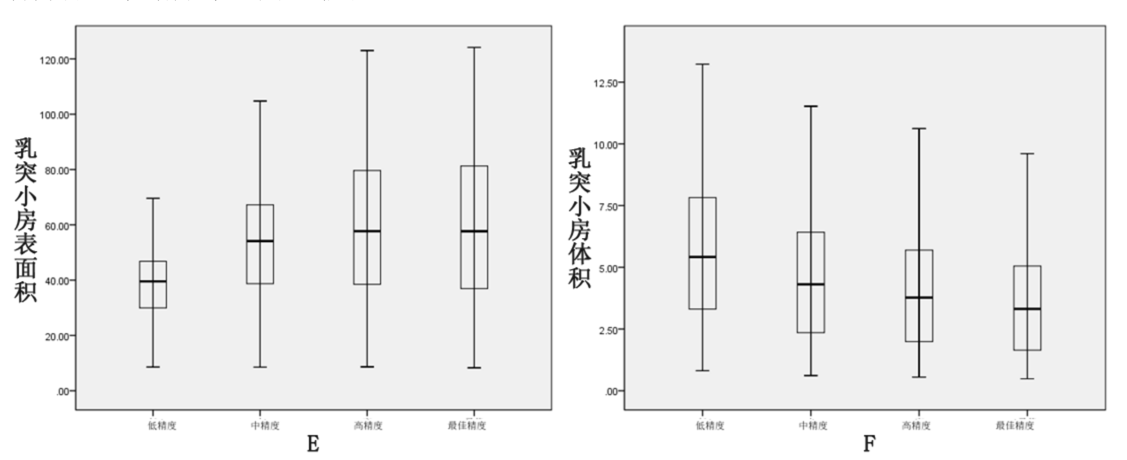


图 3 乳突小房表面积（E）及乳突小房体积（F）不同复原精度测量结果分布箱图

Fig. 3 Box-plot of surface area (E) and volume (F) of mastoid cells in different reconstructing qualities

3.2 不同精度间测量值的差异比较

在此基础上，我们将没有进行简化的最佳精度复原测量结果作为基准值，比较针对同一低精度、中精度、高精度与最佳精度之间的差异，并据此分析对不同测量指标精度造成的差异的影响。

对于顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、颅容量、乳突小房表面积、乳突小房体积，弗里德曼双向秩方差分析结果显示，各测量项的四精度测量结果的显著性指标均小于 0.05，即以上测量值的不同精度测量结果之间有明显差异。

以最佳精度复原结果作为基准值，将其他精度复原测量结果与基准值进行配对 t 检验，得到低精度、中精度、高精度与最佳精度的检验 p 值，结果见表 2，可知除乳突小房表面积的高精度复原测量数据外，其他测量项的各精度测量值均与本项最佳精度复原测量数据有显著差异。

表 2 低、中、高精度与最佳精度测量结果的配对 t 检验

Tab.2 Paring t-test between different reconstructing qualities

	低精度	中精度	高精度
顶骨矢状弦	0.000	0.000	0.017
颅周	0.000	0.000	0.000
头盖面积	0.000	0.000	0.002
颅容量	0.000	0.000	0.000
乳突小房表面积	0.000	0.000	0.084
乳突小房体积	0.000	0.000	0.000

计算各测量项的测量差异占比，得到表 3 如下，我们发现，顶骨矢状弦、颅周、头盖骨、颅容量这四项测量差异占比较小，多在 2%以下；但乳突小房表面积的低精度测量差异占比绝对值最高可达 53.571%，而体积的低精度测量差异占比绝对值可达 124.359%.

表 3 低、中、高精度与最佳精度测量结果的测量差异占比[均值（最小值~最大值），标准差]

Tab.3 Measurement difference proportion of different reconstructing qualities [average (min~max), SD]

	低精度	中精度	高精度
顶骨矢状弦	0.404%（-0.285%~1.973%，SD=0.400%）	0.151%（-0.110%~0.535%，SD=0.135%）	0.092%（-0.042%~1.057%，SD=0.192%）
颅周	-0.911%（-2.486%~0.268%，SD=0.843%）	-0.783%（-2.209%~0.336%，SD=0.726%）	-0.479%（-1.655%~0.187%，SD=0.536%）
头盖面积	-0.616%（-2.671%~0.438%，SD=0.821%）	-0.534%（-1.781%~0.096%，SD=0.461%）	-0.187%（-1.133%~0.349%，SD=0.292%）
颅容量	2.079%（1.942%~2.317%，SD=0.085%）	0.844%（0.776%~0.953%，SD=0.039%）	0.437%（0.394%~0.706%，SD=0.055%）
乳突小房表面积	-28.551%（-53.571%~24.703%，SD	-10.032%（31.805%~17.313%	0.105%（-11.577%~11.963%，S

	=19.880%）	，SD=12.934%）	D=6.365%）
乳突小房体积	65.815%（31.450%~124.359%，SD=23.365%）	29.694%（15.669%~51.025%，SD=8.572%）	14.872%（8.163%~24.343%，SD=3.910%）。

4 讨论及结论

4.1 复原精度的差异

我们的实验数据表明，Mimics 提供的简化复原精度对于我们选择的顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、颅容量、乳突小房的表面积和体积的测量都会造成与最佳复原精度结果间的显著差异。

这种差异产生自较低的 Mimics 复原精度可能造成得模型表面膨胀。对于顶骨矢状弦来说，模型表面的标志点的轻微位移会造成测量值的改变；而对于颅周、头盖面积、颅容量乳突小房的表面积体积来说，它们的测量过程需要涉及模型表面变化情况，不同精度带来的差别主要来自于在复原精度提高过程中颅骨表面的轻微缩小及表面变化的体现。

对于顶骨矢状弦、颅周、头盖面积、颅容量，虽然不同复原精度测量结果间存在统计学上的显著差异，但本批样本的测量差异占比的绝对值均在 3%以下，即使用简化复原精度的模型测量以上四项性状得到的与最佳精度测量值差异小于 3%，因此当数据精度要求低于这一条件时，可以使用简化复原精度模型进行测量。

但对于乳突小房的表面积，其低精度与最佳精度间的差异可能达到 50%以上，中精度造成的差异可达 30%以上，而数据分布与最佳精度类似的高精度组其差异也可以达到 10%以上；而对于乳突小房的体积，其低精度与最佳精度间的差异可能达到 120%以上，中精度造成的差异可达 50%以上，高精度造成的差异可达 20%以上。因此不同简化复原精度的模型测量得到的数据不可轻易比较。

4.2 Mimics 不同复原精度对乳突小房表面积、体积测量的影响

乳突小房的表面积及体积测量不同于头盖面积或是颅容量的测量。乳突小房是颞骨中由众多小的气腔组合形成的一个完整系统。这一系统，相对于头骨来说，体积小，总面积小，表面变化剧烈。针对乳突小房的两项指标，我们认为精度不同造成的巨大差异是可以理解的。从图 4 中可以看到不同复原精度得到的乳突小房模型差别明显：在计算重建乳突小房这样的多泡结构时，不同精度会影响到每个气腔的形态细节，甚至会造成气腔与气腔之间的连接。在低精度下，小的气腔在重建的模型中连成一片，会极大地影响到表面积以及体积的测量。

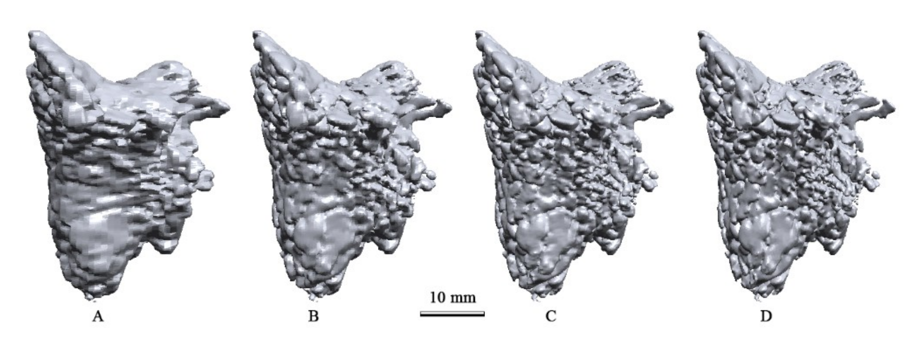


图 4 不同精度计算重建的同一乳突小房对比.
A: 低精度 B: 中精度 C: 高精度 D: 最佳精度
Fig.4 3D models in different qualities of the same mastoid air cell system
A:low quality; B:medium quality; C:high quality; D: optimal quality

对于 Mimics 的矩阵简化算法，低精度的简化为在 xy 方向上 6×分辨率，z 方向上 2×分辨率，本研究中使用的 CT 分辨率为 160μm，因此低精度简化造成的基础误差应当在 960μm，接近 1mm，对于总长度及高度分别在 3.5cm 及 2.0cm 左右，单一气腔可能小于 1mm 的乳突小房系统，虽然绝对误差小，但相比于整体体积的计算得到的相对误差(也就是测量差异占比)会远高于头盖面积、颅容量等基础数值大的测量性状，甚至造成倍数于最佳复原精度模型的测量结果。

4.3 **实际研究中的测量模型的选择**

根据我们所选取的代表性性状的测量结果，使用 Mimics 复原的模型来进行测量时，依据标志点来进行测量的弦长可以在保证标志点准确的情况下根据精度要求选择不同的复原精度；对于表面光滑，不同精度模型差异小的区域，复原精度造成的差异影响较小，选择时主要考虑的是数据的精度要求；而对于体量较大的测量量，如颅骨表面的弧长测量、面积测量或是体积测量，不同的复原精度造成的绝对差异在较大体量的基础上不会造成测量结果的巨大差异；而对于以乳突小房为代表的头骨内部腔窦这样小体量表面粗糙的部分，其不同复原精度都可能造成测量结果的质的改变，因此为了获得乳突小房的准确数据，复原精度越高越好，同时数据的横向比较只可在相同简化精度间进行比较。

对于像乳突小房的这样总量小、变化大、易受影响的性状，除了复原软件（如 Mimics）中复原精度的选择可能会影响到 CT 数据重建模型的测量，其他如使用的 CT 的分辨率的高低、复原过程中选取阈值的大小、以及复原软件对选取区域的计算方式的差异[10]都有可能造成模型测量结果的偏差。在对这些性状进行测量与比较时，需要保证测量使用的 CT 参数、复原参数、测量人员及方法的前后一致性。

致谢 感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的侯叶茂和张亚盟在 CT 扫描、三维虚拟复原过程中的技术指导，感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的潘雷和邢松在性状测量方面的交流指导。

参考文献

[1] Falk D, Clarke R. Brief communication: New reconstruction of the Taung endocast[J]. American Journal of Physical Anthropology, 2007, 134(4):529-34.

[2] Wu X J, Schepartz L A, Liu W, et al. Antemortem trauma and survival in the late Middle Pleistocene human cranium from Maba, South China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(49):19558.

[3] Balzeau A, Grimaudhervé D. Cranial base morphology and temporal bone pneumatization in Asian Homo erectus.[J]. Journal of Human Evolution, 2006, 51(4):350-359.

[4] Wu X J, Crevecoeur I, Liu W, et al. Temporal labyrinths of eastern Eurasian Pleistocene humans.[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(29):10509-13.

[5] Plotino G, Grande N M, Pecci R, et al. Three-dimensional imaging using microcomputed tomography for studying tooth macromorphology[J]. Journal of the American Dental Association, 2006, 137(11):1555-1561.

[6] Liu W, Jin C Z, Zhang Y Q, et al. Human remains from Zhirendong, South China, and modern human emergence in East Asia[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(45):19201.

[7] 邵象清. 人体测量手册. 上海. 上海辞书出版社, 1985. 57~110

[8] 潘雷, 魏东, 吴秀杰. 现代人颅骨头面部表面积的纬度分布特点及其与温度的关系[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(8):1844-1853.

[9] 张玄, 吴秀杰. 颞骨乳突小房的 3D 虚拟复原及形态变异——以现代云南人为例[J]. 第四纪研究, 2017, 37(4):747-753.

[10] Byun S W, Lee S S, Jin Y P, et al. Normal Mastoid Air Cell System Geometry: Has Surface Area Been Overestimated?[J]. Clinical & Experimental Otorhinolaryngology, 2016, 9(1):27-32.